

近断层地震动对高层建筑结构抗震性能的影响

李 旭¹, Carlos Estuardo Ventura², 何敏娟¹

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 英属哥伦比亚大学 土木工程学院地震工程研究中心, 温哥华 V6T1Z4)

摘要: 近断层地震地面运动区别于远场地震, 具有滑冲效应特性和向前方向性效应特性。其中, 具有单方向速度脉冲和阶跃式永久位移的滑冲效应对长周期结构影响较大。取 1999 年 Turkey 地震中台站 SKR 带有滑冲效应的近断层地震记录作为输入获得弹性和弹塑性反应谱, 并详细分析具有不同大小线性特征周期的单自由度体系从线性发展到非线性的整个过程中滑冲效应的作用。以某典型的钢筋混凝土剪力墙高层建筑结构为例, 具体研究近断层地震滑冲效应对结构抗震性能的影响。结果表明, 近断层地震滑冲效应除了对较长周期的高层结构抗震性能具有不利影响之外, 对可能产生较大非线性变形的短周期结构的影响同样不可忽视。

关键词: 近断层地震; 滑冲效应; 高层混凝土结构

中图分类号: P315.9; TU973+.16

文献标识码: A

Seismic Performance Assessment of High-rise Buildings Subjected to Near-Fault Ground Motion with Fling Effects

LI Xu¹, Carlos Estuardo Ventura², HE Minjuan¹

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, Earthquake Engineering Research Facility, Vancouver BC V6T1Z4, Canada)

Abstract: Near-fault ground motion with characteristics of fling step and forward directivity is significantly different from far-fault ground motion, during which fling step with permanent static displacement offset resulting in one-sided velocity pulses could be very effective in causing damage to longer period structures. The record with fling step was selected from the 1999 Turkey earthquake at station SKR. Based on the elastic and elastoplastic response spectrum, a single degree of freedom system with different linear fundamental periods and yield strengths was used to investigate the fling effects. At the same time, a typical reinforced concrete shear wall high-rise building was adopted to assess the seismic performance subjected to near-fault ground motion with fling effects. Results show that near-fault ground

motion with fling-step significantly affects the performance of high-risen structure with longer period, at the same time, for the shorter period structure, fling effects can not be ignored once structure goes to remarkable nonlinear state.

Key words: near-fault ground motion; fling-step effects; high-rise reinforced concrete structure

地震发生时, 根据场地离开断层距离的远近, 将地震动分为近断层地震动和远场地震动。通常将距离断层不超过 20~60km 区域场地的地震动称为近断层地震^[1], 大于该范围的地震动统称为远场地震。正是由于近断层地震动距离断层较近, 使得断层本身的破裂和滑动特性对地面运动影响较大, 从而明显区别于远场地震地面运动^[2]。其中, 近断层地震最为突出的特点是具有速度脉冲特性, 而引起速度脉冲的因素主要包括近断层地震向前方向性效应(forward directivity)和滑冲效应(fling-step)^[3-5]。

地震工作者从几次世界范围的大地震中获得了近断层地震动记录, 如 1992 年 Landers 地震、1994 年 Northridge 地震、1995 年 Kobe 地震、1999 年 Chi-Chi 地震、1999 年 Turkey 地震和 2010 年 Chile 地震等。这为进一步对近断层地震动的研究提供了宝贵的数据资料。通过分析近断层地震地面运动特征, 建立了诸多简化模型^[6-7], 包括简单方形、三角模型、三角函数模型等, 最被接受的是三角函数模型, 如采用 Type-A 模型表示滑冲效应, 采用 Type-B 模型表示向前方向性效应, 采用 Type-C 模型模拟含有多个脉冲的地面运动。

从很多震害现象中得出, 近断层地震对工程结构的破坏性比远场地震来得更为严重, 尤其是对高层建筑结构^[4,8-10]。近年来, 结构在近场地震下的响应特性受到学者的广泛关注, 而且普遍认为向前方向性效应比滑冲效应对结构具有更大的潜在的不利

影响^[11]. Somerville 解释了近场地震向前方向性效应,并对其建立了经验模型^[12];Hall 等指出,当向前方向性效应的脉冲持续时间与高层结构和基础隔震结构基本周期接近时会使其发生严重破坏^[10];Alavi 和 Krawinkler 定量分析了框架结构在具有向前方向性效应的近场地震作用下的线性和非线性反应特性^[13];Iwan 认为,采用剪切梁模型波传分析的位移角谱(drift spectrum)可以更为直接地体现近场地震响应^[14];Chopra 等通过计算指出,当考虑足够数量的高阶模态响应,采用传统的反应谱分析法分析近场地震向前方向性效应对结构的影响可以达到工程要求的精度^[15].

相比而言,对近场地震滑冲效应的研究相对较少. Abrahamson 提出滑冲效应的几个特性参数,包括幅值、持续时间和到达时间^[5];Kalkan 和 Kunnath 调查了滑冲效应和向前方向性效应对具有不同周期特性的钢框架结构的影响^[16];杨迪雄等通过对短肢剪力墙高层结构、隔震建筑结构以及高层钢结构等的研究进一步表明,脉冲型地震动主要激发结构基本振型的反应,且滑冲效应引起的速度脉冲对长周期建筑结构的危害性尤为突出^[7,17-20]. 尽管如此,滑冲效应对实际结构的抗震性能影响还未被充分认识,特别是高层建筑结构在近场地震滑冲效应作用下的非线性响应特性.

本文选取一组典型的具有滑冲效应的近场地震记录,即 1999 年 Turkey 地震 SKR-EW 台站地震记录作为输入,采用人工过滤方式获得带有滑冲效应记录(简称 with fling record)和无滑冲效应记录(简称 without fling record). 首先,通过单自由度体系弹性和弹塑性反应谱分析总体了解滑冲效应特性,并通过改变具有不同特征周期体系的屈服强度评估系统从线性到非线性的整个变化过程中滑冲效应对其抗震性能的影响. 最后,以某典型的高层钢筋混凝土剪力墙结构为例具体研究高层建筑结构在带有滑冲效应的近场地震作用下的抗震性能.

1 近断层地震动概述

对地震机理的研究表明,近断层地震动产生于断层的断裂过程^[4,21]. 地震发生时,断层快速滑动并沿着断裂方向向前发展,于是出现了永久性地面位移偏量,在此过程中地震能量以垂直于断层的地震波的形式传播. 对于位于断层破裂向前方向上的场地,当断层破裂速度与地震剪切波速一致时,断层破

裂能量累积达到幅值,从而引起强烈的地面脉冲运动. 其中,将产生永久性地面位移偏移的特性称为滑冲效应,将引起强烈地面脉冲运动的特性称为向前方向性效应^[3,13-14].

由上述断层断裂机理可知滑冲效应的突出特点为较大的地面阶跃式的永久位移偏移以及单方向速度脉冲;而向前方向性效应则具有较长持时的动力脉冲运动和连续的双向速度半脉冲的特性. 对于走滑断层(strike-slip earthquake),滑冲效应出现在平行断层走向方向,向前方向性效应则垂直于断层走向;对于倾滑断层(dip-slip earthquake),滑冲效应和向前方向性效应均垂直于断层走向,两者发生耦合. 图 1 显示了 2 类断层中滑冲效应、向前方向性效应与断层方向的关系^[1]. 图 2 展示了 2 类断层中带有滑冲效应和向前方向性效应的地面位移运动特点^[1]. 由此看来,尽管滑冲效应和向前方向性效应均具有速度脉冲特性,但两者具有明显区别,对建筑结构的抗震性能影响也不尽相同,须分别考虑. 本文主要研究近断层地震滑冲效应对结构抗震性能的影响.

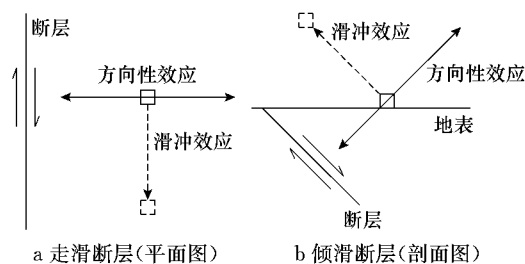


图1 走滑断层和倾滑断层中的向前方向性效应和滑冲效应
Fig.1 The orientations of fling-step and directivity pulse for strike-slip and dip-slip faulting

2 近断层地震滑冲效应特性

2.1 地震记录

为研究近断层地震滑冲效应对结构抗震性能的影响,以具有代表性的 1999 年 Izmit Turkey 地震(震级 $M_w=7.4$)为例,因断层性质为走滑断层,故而在近断层区域平行断层断裂方向的地面运动中存在滑冲效应. 选取距离断层 3.1 km 的台站 SKR 东西向(即平行于断层方向)的地震记录,见图 3 所示,其中有滑冲效应地震记录的峰值地面加速度(PGA)为 0.399 g,峰值地面速度(PGV)为 $80.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,峰值地面位移(PGD)为 204.5 cm. 同时,图 3 也列出了由英国帝国理工学院修正处理后无滑冲效应的地

震记录,处理方法为八阶椭圆带通法(8th order elliptical band pass method),过滤频率区间 0.25~25.00 Hz,PGA 为 0.354 g,PGV 为 $32.9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, PGD 为 12.5 cm. 由图 3c 中有滑冲效应的位移时程数据中可以看出,位于 31~36 s 时间段内存在较大的永久性位移偏移,偏移量约为 200 cm,于是滑冲效应持时 $T_p = 5 \text{ s}$;对应图 3b 速度时程曲线时间段 31~36 s 内,有滑冲效应地震记录中带有明显的单方向速度半脉冲特性;尽管如此,图 3a 有、无滑冲效应的加速度时程曲线却无明显差别。

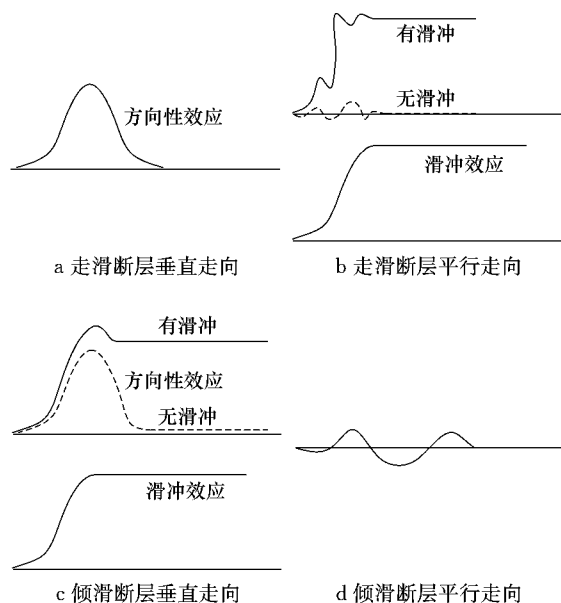


图 2 走滑断层和倾滑断层中向前方向性效应和滑冲效应位移时程

Fig. 2 Displacement time histories for strike-slip and dip-slip faulting in which the fling-step and directivity pulse are shown together and separately

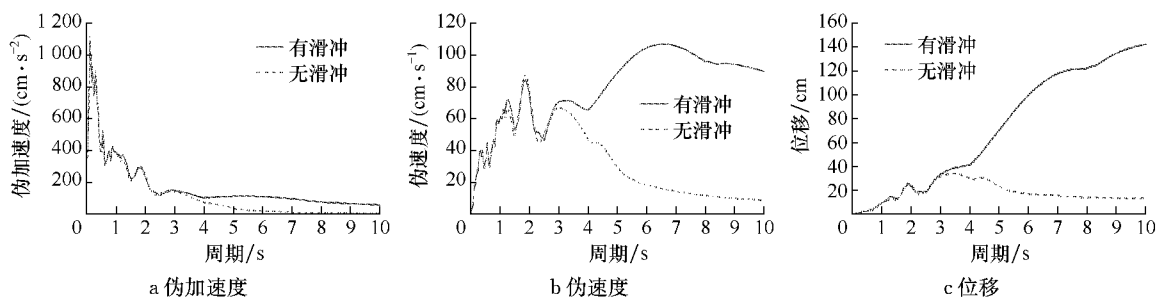


图 4 有、无滑冲效应记录弹性反应谱

Fig. 4 Response spectrum for raw records with fling and corrected records without fling

位移响应开始缓慢减小并最终趋于某个相对较小的变形量,这与通常认识到的地震对长周期结构影响不是很大相一致;然而,当周期大于 3s,在有滑冲效

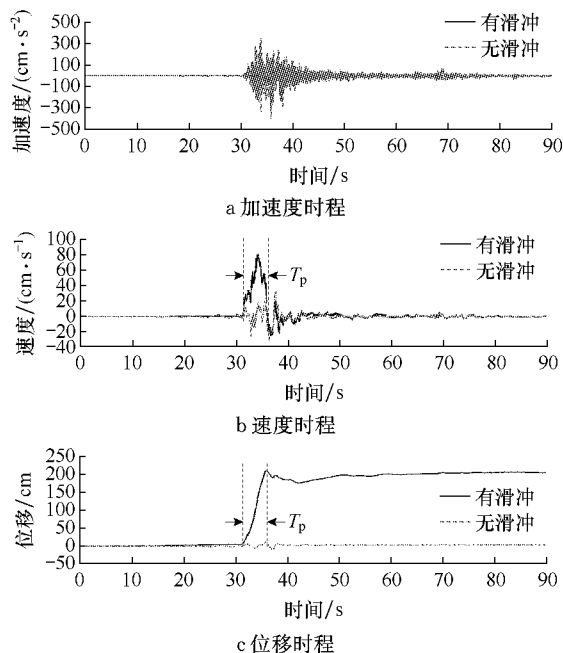


图 3 SKR-EW 台站加速度、速度和位移时程

Fig. 3 Acceleration, velocity and displacement time history records from SKR-EW station

2.2 弹性反应谱

取上述有、无滑冲效应地面运动加速度时程作为输入,求得单自由度体系(阻尼比为 0.05)的弹性反应谱^[17]见图 4。

由图 4 可以看出:①当周期小于 3s,系统在有、无滑冲效应地震作用下,弹性反应谱差别不大;②当周期大于 3s,系统在有滑冲效应地震作用下的弹性反应谱开始大于无滑冲效应地震作用下的弹性反应谱,且当周期大于 4s 之后,滑冲效应明显放大系统的速度和位移响应,见图 4b 和 c 中所示;③图 4c 中,当周期大于 3s,在无滑冲效应地震作用下,系统

位移响应开始缓慢减小并最终趋于某个相对较小的变形量,从而证实了近场地震滑冲效应对长周期结构影响显著的结论。

2.3 弹塑性反应谱

在强度较大的地震作用下,结构通常会进入非线性状态,在此取单自由度体系弹塑性模型(阻尼比为0.05)计算非线性反应谱^[22].图5列出了在有、无滑冲效应地震作用下延性系数 $\mu=1,2,4,6$ 的单自由度体系弹塑性位移反应谱,其中 $\mu=1$ 表示弹性反应谱, $\mu>1$ 表示弹塑性反应谱.总体上看,弹塑性位移反应谱和弹性位移反应谱变化趋势是一致的,即当系统周期较小,在有、无滑冲效应地震作用下位移反应谱差别不大,当系统周期较大时,滑冲效应明显放大了系统的位移响应.值得注意的是,对于弹性反应谱,当系统周期大于3s后滑冲效应才开始影响结构响应,然而对于弹塑性反应谱,当系统周期大于2s,滑冲效应便开始影响结构地震响应,且延性系数越大,影响越大.

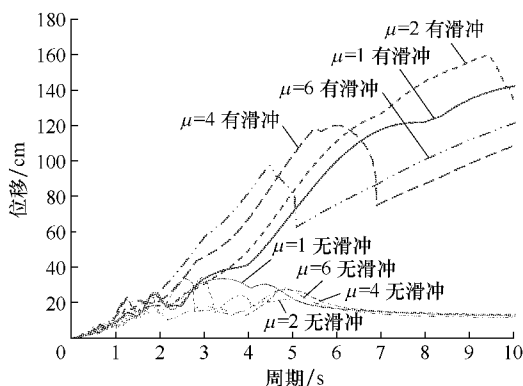


图5 单自由度体系弹塑性位移反应谱
Fig. 5 Elastoplastic displacement response spectrum of single-degree-of-freedom system

因此,既然实际结构在地震作用下均会出现非线性变形,同时伴随结构刚度的退化以及对应非线性特征周期的延长,那么近断层地震滑冲效应除了对较长线性特征周期结构具有较大影响之外,对具有中、短线性特征周期结构的影响同样不可忽视.

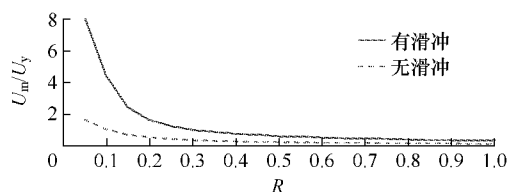
3 滑冲效应对不同周期系统地震响应的影响

为了进一步深入研究具有不同大小线性特征周期的结构系统从线性发展到非线性的整个过程中近断层地震滑冲效应对系统响应的影响,本文选取线性特征周期分别为2s和5s的单自由度体系,并通过改变屈服强度的大小来实现系统从线性到非线性的变化.为方便分析,引入2个概念,归一化强度 R 和

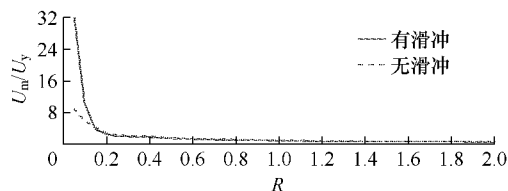
变形放大系数 D . $R = F_y / (M \cdot P_{GA})$,式中: F_y 为系统屈服强度; M 为系统质量; P_{GA} 为地震加速度峰值. $D = d_1 / d_2$,式中: d_1, d_2 分别为有、无滑冲效应地震作用下的系统变形.

采用修正的Clough模型($K_2/K_1 = 0.01$, K_1, K_2 分别为系统初始刚度、非线性刚度)模拟系统非线性滞回变形,阻尼比取0.03,考虑P-Delta效应.图6为在有、无滑冲效应地震作用下,周期分别为5s,2s的单自由度系统 U_m/U_y 与归一化强度 R 关系,其中 U_m 为系统最大位移, U_y 为系统屈服位移,当 $U_m/U_y < 1.0$ 时系统处于线性阶段,当 $U_m/U_y > 1.0$ 则表示系统进入非线性阶段.

图6a中,对于较长周期系统($T=5s$),在有滑冲效应地震作用下的系统变形始终大于无滑冲效应地震作用下的系统变形,且随着系统屈服强度的降低, R 减小到一定程度,系统进入非线性状态(如图6a中 $R < 0.3$),滑冲效应对结构影响更为明显.图6b,对于较短周期系统($T=2s$),当系统屈服强度较大,结构响应在有、无滑冲效应地震作用下基本保持一致,滑冲效应作用未显现;随着系统屈服强度降低,系统在地震作用下进入明显的非线性状态(如图6b中 $R < 0.2$),此时,滑冲效应极大地放大了结构变形响应值.



a $T=5s$



b $T=2s$

图6 单自由度系统 U_m/U_y 与归一化强度 R 关系

Fig. 6 Relationship between U_m/U_y and normalized strength R for single-degree-of-freedom system

由图7知,对于较长周期系统($T=5s$),当系统屈服强度较大($R > 0.3$),并处于线性阶段, $D=3.0$,表示系统在有滑冲效应地震作用下的位移响应为无滑冲效应下位移响应的3倍;当系统屈服强度变小($R < 0.3$),系统进入非线性阶段, D 开始增大,最

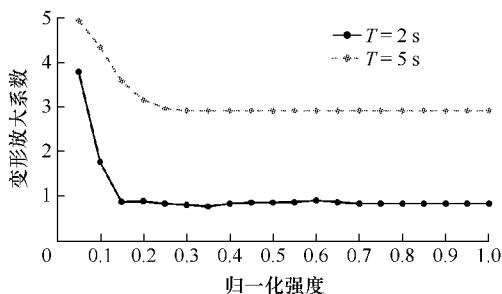


图7 不同周期单自由度系统变形放大系数与归一化强度的关系

Fig. 7 Deflection amplification factor vs. normalized strength for single-degree-of-freedom system with different linear fundamental periods

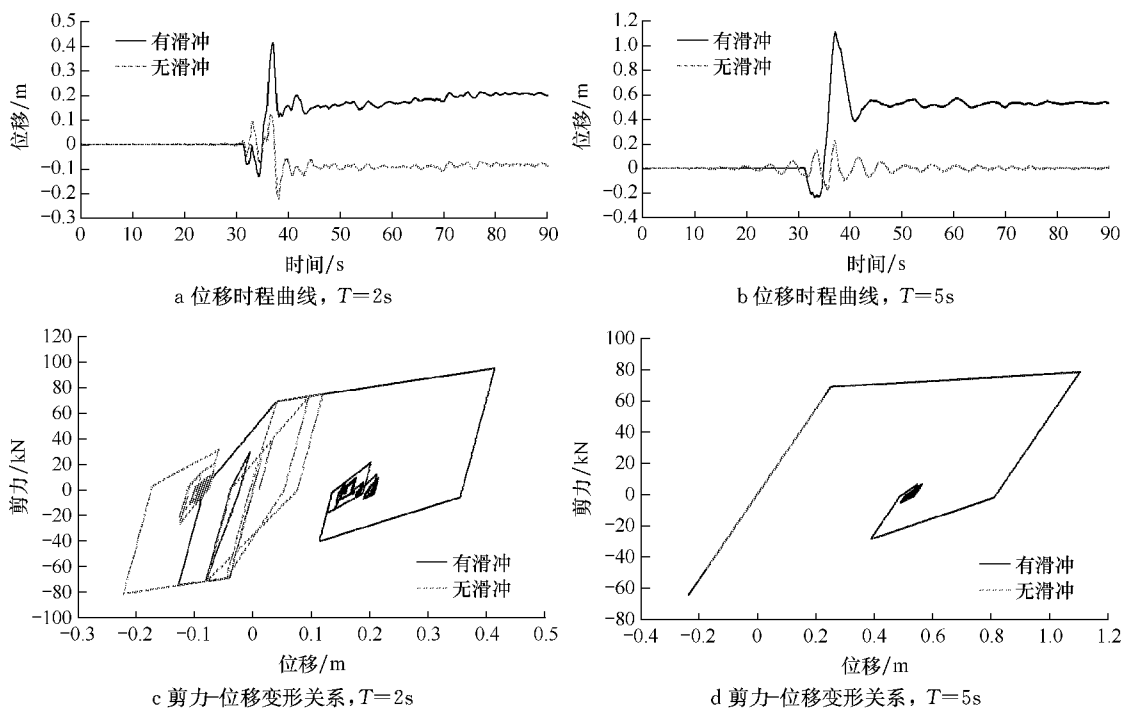


图8 $R=0.1$ 时不同周期单自由度系统位移时程曲线和剪力-变形曲线

Fig. 8 Displacement time history curve and shear force to displacement curve for single-degree-of-freedom system with different periods due to $R=0.1$

4 近断层地震滑冲效应对高层结构的影响

4.1 高层钢筋混凝土结构概述

某高层钢筋混凝土剪力墙住宅结构高 83.2 m, 32 层, 平面尺寸 31.7 m \times 24.7 m, 见图 9. 结构由竖向 12 根通长的柱和中央混凝土核心筒承担荷载. 结构用材为: 底层 5~9 层混凝土强度为 30 MPa, 10~19 层混凝土强度为 35 MPa, 20~32 层混凝土强度为 40 MPa; 钢筋强度为 400 MPa, 结构详细信息见

文献[23]. 大值达到 5.0, 表明滑冲效应作用更为显著; 对于较短周期系统 ($T=2$ s), 当系统屈服强度较大 ($R>0.2$), 此时处于线性状态或者仅出现较小的非线性变形, D 基本保持 1.0, 表明滑冲效应尚未影响结构响应, 但随着系统屈服强度的进一步减小 ($R<0.2$), 系统进入较明显的非线性状态, 此时 D 明显增大, 最大值达到 4.0, 表明滑冲效应对结构影响相当突出.

图 8 列出了周期分别为 5s, 2s, $R=0.1$ 的单自由度系统在有、无滑冲效应地震作用下的位移时程曲线和剪力-变形曲线. 滑冲效应对结构影响均较大, 且使 2 个系统均发生了较大的永久性位移变形.

文献[23].

本文采用 CANNY 有限元分析软件建模, 见图 9d, 抗剪采用 Clough 模型, 抗扭采用线性模型, 对于墙、柱单元采用 MS 模型考虑竖向荷载和双向受弯之间的相互作用. 基于钢筋、混凝土材料特性建立其本构关系, 钢材采用 SS3 滞回模型, 混凝土采用三线性 CS3 滞回模型^[24]. 结构分析时考虑 P-Delta 效应, 采用 Newmark- β ($\beta=0.25$) 法逐步积分, 时间间隔为 0.005 s, 采用 Rayleigh 阻尼, 阻尼系数取 0.032, 此时模型线性基本周期为 1.9 s.

或过小时都将难以形成合理的拱轴线,拱桥将不是最优的结构形式。

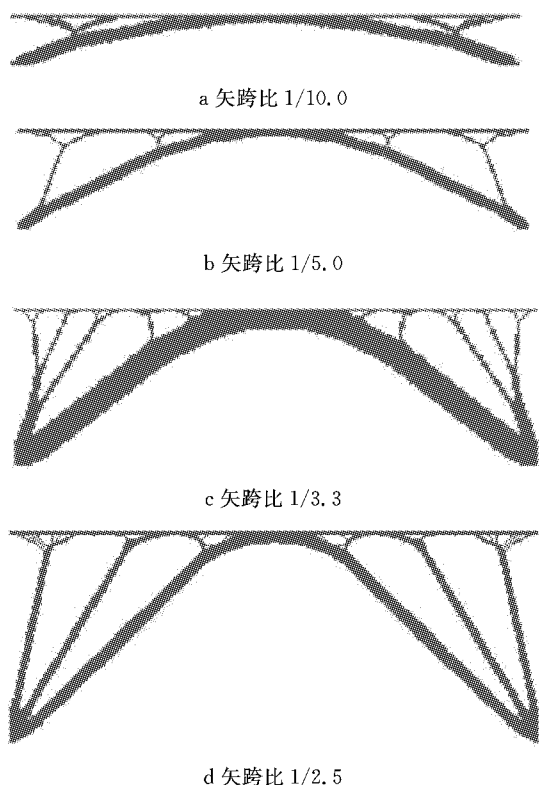


图2 不同矢跨比拱桥拓扑优化结果

Fig.2 BESO solution for arch bridges with different rise-span ratios

在矢跨比为 1/10.0 时,优化过程中共经历了桁架结构、斜腿刚构、上承式拱桥 3 种主要的结构拓扑形态,如图 3 所示。正是由于采用了双向结构渐进法,优化过程中结构得以在不同的拓扑形式间转换。否则,在该矢跨比条件下,优化将在第 1 种桁架拓扑形态破坏后终止,而无法形成上承式拱桥。

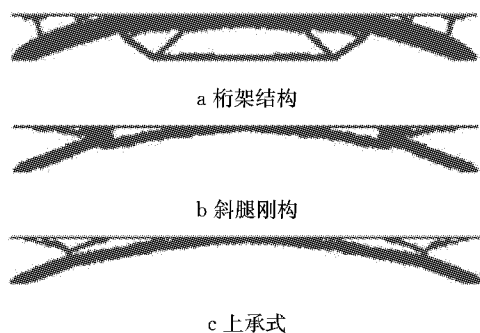


图3 矢跨比 1/10.0 拱桥拓扑优化过程

Fig.3 BESO process for arch bridge with a height to span ratio of 1/10.0

虽然这 3 种结构形态的进化率不同,但作为优化过程的中间结果都可以认为是受力相对合理的结

构形式。尤其是在概念设计阶段的找型应用,不论是中间结果还是最终结果都可以作为设计的比选方案。至于最终采用哪种桥梁形式,还需要综合考虑净空要求、可施工性、美观等因素后决定。

3.2 下承式拱桥找型

若仍采用矢跨比 1/5.0 的设计区域,将支撑位置设置为与桥面相同高度处,桥面位于优化区域的下方,则经拓扑优化后可得到下承式拱桥的形式,如图 4 所示。由于采用的是 Von Mises 应力准则,优化过程中不会区分单元的拉压性质,因此将下承式拱桥的优化区域和边界条件以桥面对称后,优化结果与下承式拱桥相对于桥面对称,如图 5 所示。这种拓扑形式与上承式悬带桥的结构形式相似,该桥型与下承式拱桥的受力特点相反,悬带以受拉为主而悬带上的立柱则主要受压。



图4 下承式拱桥拓扑优化结果

Fig.4 BESO solution for tied-arch bridge

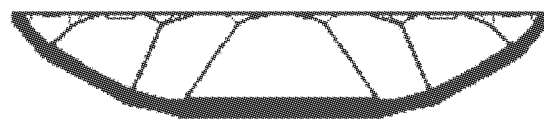


图5 悬带桥拓扑优化结果

Fig.5 BESO solution for stressed ribbon

上述结构优化区域内都采用了单一材料,但由于各个部件拉压受力明确,所以在实际应用中根据受力性质的不同而采用不同的材料。下承式拱桥的主拱圈和悬带桥的立柱以受压为主,通常采用混凝土或型钢材料;下承式拱桥吊杆和悬带桥的悬带以受拉为主,通常采用平行钢丝索或钢绞线。不同材料的容许应力各不相同,而采用 Von Mises 应力作为优化准则得到的结果中单元应力相近,也就是说高强度材料的性能没能充分发挥。如果仅是进行概念设计中的结构找型那么该结果是有意义的,但若在此优化结果上进行详细设计则还需要依据不同材料的性能进行尺寸优化。

3.3 悬索桥主缆找型

在悬索桥的优化过程中人们最关心的是主缆的形状,因此,下文只对主缆的线形进行优化。假定采用竖直吊杆,将吊杆所在列的所有单元均设置为不可删除的单元,吊杆下端设置竖向的集中力。不考虑桥塔和桥面,只在主缆的两端设置固定约束,如图 6a

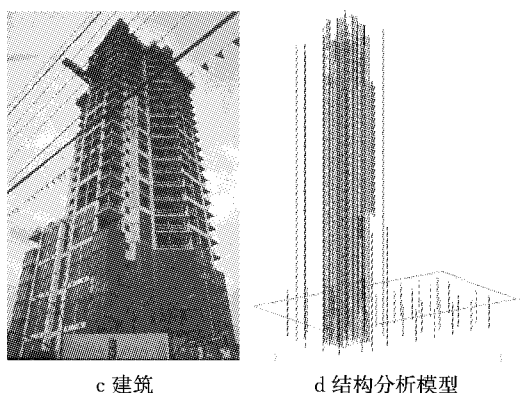
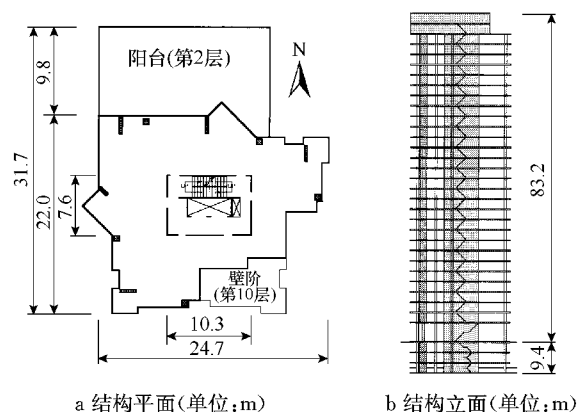


图 9 混凝土剪力墙高层结构

Fig. 9 Reinforced concrete shear wall high-rise building

基于上述原始模型(称之为模型①),建立了模型②和模型③,3个模型力-位移曲线相关关系见图 10 所示,其中 F_{yi} 为屈服力, D_{yi} 为屈服位移, D_m 为极限位移。模型②为具有底部薄弱层结构模型:将模型①底层混凝土屈服强度降低到原来的 25%,此时结构总体刚度基本不发生变化,线性基本周期约为 2.2s;模型③为总刚度软化模型,其降低模型①所用混凝土材料等级,结构总体刚度变小,线性基本周期延长到 4 s。对比 3 个模型,模型①和②具有相对较短的线性特征周期,在等强度地震下,模型②产生更大的非线性变形,这样可以了解近断层地震滑冲效应对处于不同非线性状态的短周期高层建筑结构的影响;模型③具有相对较长的线性基本周期,用于研究近断层地震滑冲效应对较长周期结构的影响。

4.2 地震弹塑性时程分析

将 SKR-EW 有、无滑冲效应地震记录作为输入(图 3),分别对模型①~③进行地震弹塑性时程分析。在有滑冲效应地震作用下结构非线性基本周期峰值明显大于无滑冲效应下的峰值(图 11a),同时

滑冲效应使结构产生了永久变形(图 11b)。

由图 12 可见,结构楼层底部剪力差别不大,但滑冲效应对层间位移角的放大作用却很明显。

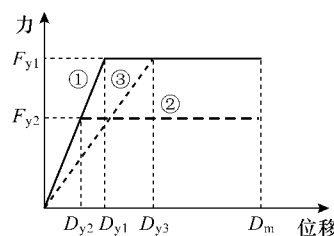
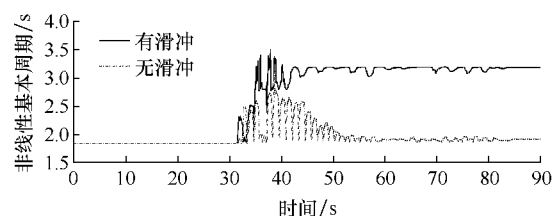
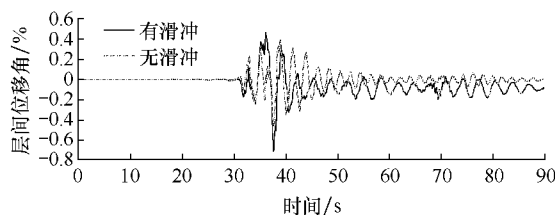


图 10 3 个模型力-位移曲线简化模型

Fig. 10 Relationship of force and displacement of three models



a 非线性基本周期时程曲线



b 顶层层间位移角时程曲线

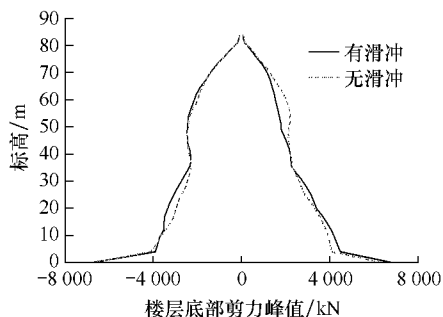
图 11 模型①结构非线性基本周期和顶层层间位移角时程曲线

Fig. 11 Nonlinear fundamental period time history and roof drift ratio time history for Model①

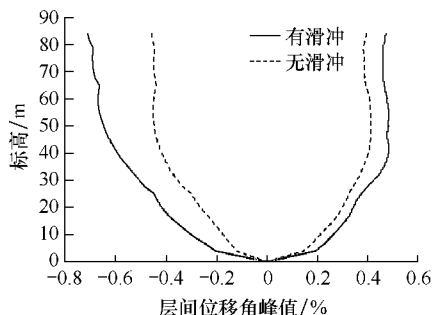
图 13 列出了模型②和模型③在有、无滑冲效应地震作用下层间位移角峰值沿高度的变化情况。滑冲效应对这 2 个结构层间位移角的放大作用更加显著。

表 1 列出了 3 个模型在有、无滑冲效应地震作用下层间位移角峰值以及对应的变形放大系数。

对比模型①和②的层间位移角峰值及变形放大系数可见,对于较短周期结构,具有底部薄弱层模型会使结构产生更大的非线性变形,且变形放大系数从 1.54 增大到 3.56,滑冲效应作用更明显;对比模型①和③的变形峰值可见,对于具有较长周期的模型③,最大层间位移角比模型①要大,同时变形放大系数从 1.54 增大到 2.12,滑冲效应作用也更大。



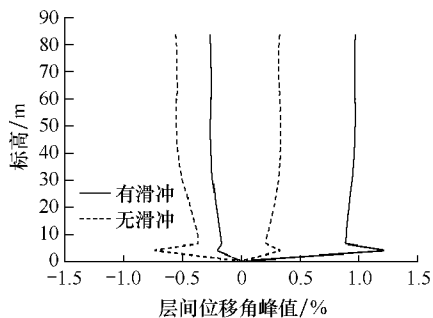
a 楼层底部剪力峰值



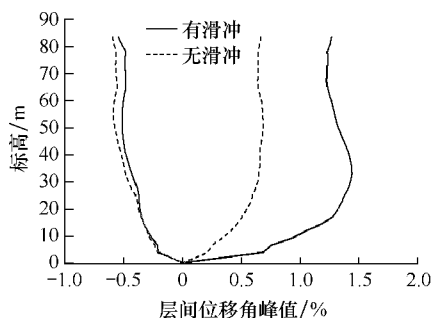
b 层间位移角峰值

图12 模型①剪力峰值和层间位移角峰值随高度的变化

Fig.12 Peak shear force and peak drift ratio along the height of the building for Model①



a 模型②层间位移角峰值



b 模型③层间位移角峰值

图13 模型②和模型③层间位移角峰值随高度的变化

Fig.13 Peak drift ratio along the height of the building for Model② and Model③

表1 3个模型层间位移角峰值

Table 1 Peak drift ratio for three models

模型	层间位移角峰值/%		变形放大系数
	有滑冲	无滑冲	
①	0.48	0.41	1.17
	-0.71	-0.46	1.54
②	1.21	0.34	3.56
	-0.26	-0.73	0.36
③	1.44	0.68	2.12
	-0.55	-0.60	0.92

5 结论

详细研究了近场地震滑冲效应的特性,取1999年 Turkey 地震中台站 SKR-EW 有、无滑冲效应地震记录作为输入,获得单自由度体系弹性反应谱和弹塑性反应谱,证实了近场地震滑冲效应对结构抗震性能具有一定程度的影响.之后,详细分析了具有不同大小线性特征周期的单自由度体系从线性发展到非线性的整个过程中近断层地震滑冲效应作用.最后以某典型高层钢筋混凝土建筑结构为例建立了具有底部薄弱层模型、整体刚度软化模型,进一步研究近断层地震滑冲效应对具有不同屈服强度、不同周期的高层建筑结构的影响.结论如下:

(1)对于较长周期结构,滑冲效应始终放大结构变形响应,尤其是当结构屈服强度较小并出现较大的非线性变形时,滑冲效应更为显著.

(2)对于较短周期结构:①当结构强度足够大并在地震作用下处于线性阶段,滑冲效应几乎不会影响结构变形响应;②随着结构屈服强度的降低并在地震作用下进入明显的非线性状态,滑冲效应对其影响便可显现.对于具有底部薄弱层的高层建筑结构,滑冲效应影响尤为突出.

参考文献:

- [1] Stewart J P, Chiou S J, Bray J D, et al. Ground motion evaluation procedures for performance-based design[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22: 765.
- [2] 李爽,谢礼立. 近场问题的研究现状与发展方向[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 102.
LI Shuang, XIE Lili. Progress and trend on near-field problems in civil engineering [J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29 (1): 102.
- [3] Bray J D, Rodriguez-Marek A. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(11): 815.
- [4] Hall J F, Aagaard B T. Fundamentals of the near-source

- problem[C]//Proceedings of the 5th Caltrans Seismic Research Workshop Sacramento:[s.n.], 1998:10.
- [5] Abrahamson N. Incorporating effects of near fault tectonic deformation into design ground motions [EB/OL]. [2001-10-26]. <http://mceer.buffalo.edu/outreach/pr/abrahamson.asp>.
- [6] Mavroeidis G P, Papageorgiou A S. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(3): 1099.
- [7] Yang D, Pan J, Li G. Inter-story drift ratio of building structures subjected to near-fault ground motions based on generalized drift spectral analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30:1182.
- [8] Zhang Y, Iwan W D. Active interaction control of tall buildings subjected to near-field ground motions [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(1), 69.
- [9] Zhang Y, Iwan W D. Protecting base-isolated structures from near-field ground motion by tuned interaction damper [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(3): 287.
- [10] Hall J F, Heaton T H, Halling M W, et al. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings [J]. Earthquake Spectra, 1995, 11(4): 569.
- [11] Tothong P, Cornell C A. Structural performance assessment under near-source pulse-like ground motions using advanced ground motion intensity measures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamic, 2008, 37:1013.
- [12] Somerville P G. Engineering characteristics of near fault ground motion[C]//SMIP 97 Seminar on Utilization of Strong Ground Motion Data. Los Angeles:[s.n.], 1997:9-28.
- [13] Alavi B, Krawinkler H. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004, 33:687.
- [14] Iwan W D. Drift spectrum; measure of demand for earthquake ground motions[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(4):397.
- [15] Chopra A K, Chintanapakdee C. Drift spectrum versus modal analysis of structural response to near-fault ground motions [J]. Earthquake Spectra, 2001, 17(2):221.
- [16] Kalkan E, Kunnath S K. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings [J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(2): 367.
- [17] 杨迪雄,赵岩. 近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对隔震建筑结构抗震性能的影响[J]. 地震学报, 2010, 32(5): 579.
- YANG Dixiong, ZHAO Yan. Effects of rupture forward directivity and fling step of near-fault ground motions on seismic performance of base-isolated building structure [J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(5): 579.
- [18] 江义,杨迪雄,李刚. 近断层地震动向前方向性效应和滑冲效应对高层钢结构地震反应的影响[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 103.
- JIANG Yi, YANG Dixiong, LI Gang. Effects of forward directivity and fling step of near-fault ground motion on seismic responses of high-rise steel structure [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 103.
- [19] 杨迪雄,李刚,程耿东. 近断层脉冲型地震动作用下隔震结构地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(2): 119.
- YANG Dixiong, LI Gang, CHENG Gengdong. Seismic analysis of base-isolated structures subjected to near-fault pulse-like ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(2): 119.
- [20] 杨迪雄,潘建伟,李刚. 近断层脉冲型地震动作用下建筑结构的层间变形分布特征和机理分析[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4): 108.
- YANG Dixiong, PAN Jianwei, LI Gang. Deformational distribution feature and mechanism analysis of building structures subjected to near-fault pulse-type ground motions [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4): 108.
- [21] Chen X. Near-field ground motion from the Landers earthquake [EB/OL]. [2011-02-01]. <http://resolver.caltech.edu/CaltechEERL:1995.EERL-95-02>.
- [22] Chopra A K. Dynamic of structures, theory and applications to earthquake engineering [M]. 2nd ed. [S. l.]: Pearson/Prentice Hall, 2007.
- [23] White T, Ventura C E. Ground motion sensitivity of a Vancouver-style high rise [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31: 292.
- [24] 李康宁,洪亮. 结构三维弹塑性分析方法及计算机程序 CANNY[J]. 四川建筑科学研究, 2001, 27(4): 1.
- LI Kangning, HONG Liang. CANNY software for elastic and plastic analysis of 3-dimensional structure [J]. Building Science Research of Sichuan, 2001, 27(4): 1.